

Perancangan dan Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor Tiga Fasa pada Mesin Sentrifugal dengan Menggunakan Metode *Linear Quadratic Tracking (LQT)*

Fahmi Hidayah, Rusdhianto Effendie AK, dan Josaphat Pramudijanto

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: jos@elect-eng.its.ac.id

Abstrak—Motor induksi 3 fasa banyak digunakan di industri, salah satunya pada industri pabrik gula. Di industri pabrik gula motor induksi 3 fasa digunakan pada mesin sentrifugal. Mesin ini digunakan untuk proses pemisahan cairan *massacuite* dan *strup* hingga didapat kristal gula. Pada proses tersebut terjadi perubahan beban oleh karena itu, pada siklus kecepatannya mengalami proses *charging*, *spinning* dan *discharging*. Namun, Pengaturan kecepatan motor induksi yang ada masih dilakukan secara manual yaitu dengan merubah posisi puli atau ukuran poros dari mesin sentrifugal. Pengaturan dengan metode ini mengakibatkan kecepatan motor akan sulit dikendalikan sesuai dengan yang diharapkan. Pengaturan kecepatan yang tidak tepat juga dapat mengakibatkan hasil produksi gula yang kurang maksimal. Oleh karena itu, dibutuhkan metode kontrol untuk mengoptimalkan kecepatan motor saat mengalami proses *charging*, *spinning* dan *discharging* yang sesuai dengan *setpoint* yang diberikan. Metode kontrol yang digunakan adalah metode *Linear Quadratic Tracking (LQT)*. Kontroler LQT diimplementasikan pada PLC Mitsubishi *Q-series* dan dengan HMI GT Designer3. Dari hasil simulasi didapat pembobot $Q=100$ dan $R=1$. Selanjutnya pembobot Q dan R ini digunakan untuk mendapatkan nilai dari sinyal kontrol. Algoritma sinyal kontrol yang diperoler selanjutnya diubah dalam bahasa pemrograman ladder diagram untuk diimplementasikan dengan PLC. Dari hasil implementasi yang dilakukan, didapatkan bahwa kontroler LQT yang digunakan dapat memperbaiki % error hingga 15,8% dari *steady state*. Selain itu dalam Tugas Akhir ini kontroler LQT juga mampu memperbaiki spesifikasi respon agar menjadi lebih baik. Sehingga Tugas Akhir ini dapat membantu meningkatkan efisiensi mesin sentrifugal.

Kata Kunci—LQT, Mesin Sentrifugal, Motor Induksi, PLC.

I. PENDAHULUAN

MESIN sentrifugal adalah mesin yang menggunakan prinsip gaya sentrifugal. Mesin ini biasanya digunakan untuk mengeringkan kripik, baju basah atau pada dunia industri Pabrik Gula digunakan sebagai pemisah cairan *massacuite* dengan *strup* agar didapat kristal gula pada proses sentrifugal. Oleh karena itu, mesin sentrifugal banyak ditemui pada Pabrik Gula yang ada di Indonesia. Pentingnya pemanfaatan mesin sentrifugal ini membutuhkan proses pengaturan kecepatan yang sesuai yaitu proses *charging*, *spinning* dan *discharging*. Namun Pengaturan kecepatannya masih dilakukan secara manual yaitu dengan merubah posisi puli atau ukuran poros dari mesin sentrifugal. Pengaturan dengan metode ini akan

mengakibatkan kecepatan motor menjadi sulit dikendalikan sesuai dengan yang diharapkan. Pengaturan kecepatan yang tidak tepat juga dapat mengakibatkan hasil produksi gula yang kurang maksimal [1].

Oleh karena itu dibutuhkan suatu cara untuk dapat mengatur kecepatan dari mesin sentrifugal ini agar dapat mempertahankan kecepatan secara optimal meski terjadi perubahan beban sehingga waktu interval yang dibutuhkan untuk mesin sentrifugal tersebut *charging*, *spinning* dan *discharging* dapat sesuai dan lebih optimal. Karena karakteristik dari kecepatan sentrifugal yang *tracking* maka metode kontrol yang akan digunakan yaitu metode *Linear Quadratic Tracking (LQT)*.

Melalui Tugas Akhir yang berjudul “Perancangan dan Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor 3 Fasa Pada Mesin Sentrifugal dengan Menggunakan Metode *Linear Quadratic Tracking (LQT)*” diharap dapat menjadi referensi untuk menangani masalah pengaturan kecepatan motor pada mesin sentrifugal ini secara baik. Selain itu juga dapat membantu meningkatkan efisiensi pada mesin sentrifugal.

II. DISKRIPSI PERMASALAHAN

Pada Industri Pabrik Gula motor induksi 3 fasa banyak digunakan pada berbagai proses produksi dan pada Tugas Akhir ini penggerak mesin sentrifugal yaitu motor induksi sebagai penggerakannya. Motor induksi memiliki konstruksi yang kuat, sederhana, handal, serta berbiaya murah. Di samping itu motor ini juga memiliki efisiensi yang tinggi saat berbeban penuh dan tidak membutuhkan perawatan yang banyak. Akan tetapi jika dibandingkan dengan motor DC, motor induksi masih memiliki kelemahan dalam hal pengaturan kecepatan, dimana pada motor induksi pengaturan kecepatan sangat sulit untuk dilakukan.

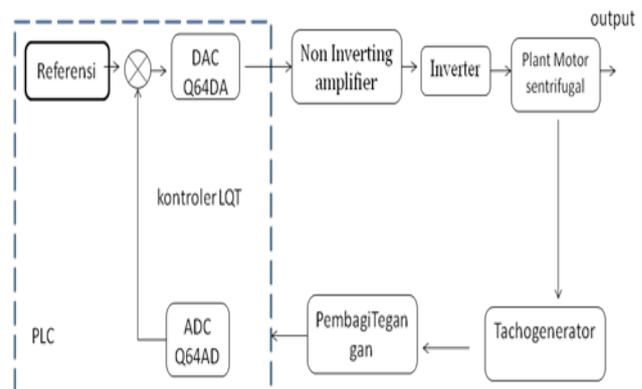
Pengaturan kecepatan motor induksi yang relatif sulit untuk di kendalikan Sehingga dibutuhkan Kontroler yang bisa membuat kecepatan motor tetap stabil walaupun diberi beban yang besar. Selain itu pada kasus mesin sentrifugal kecepatan motor harus mengikuti *tracking* yang telah ditentukan karena jika kecepatan dari motor tidak bisa mengikuti *tracking* maka kualitas gula juga tidak akan sesuai yang diharapkan [1].

Beberapa industri Pabrik Gula Swasta sudah menggunakan PLC dalam melakukan kontrol kecepatan dari mesin sentrifugal untuk mengatasi permasalahan tersebut, biasanya menggunakan algoritma kontrol yang sederhana yaitu dengan mengganti *setpoint* dari kecepatan motor

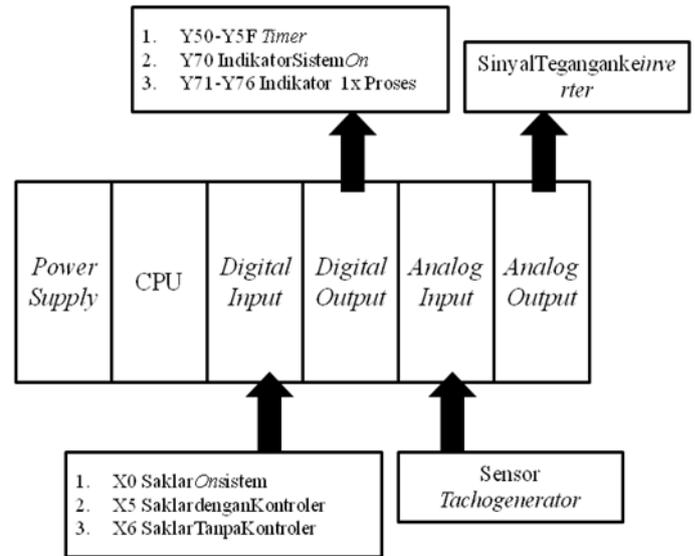
dengan *timer*. Penggunaan *timer* sebagai algoritma kontrol dari mesin sentrifugal tentunya kecepatan motor tidak akan sesuai dengan yang telah ditentukan. Sehingga dibutuhkan kontroler yang dapat mengatasi permasalahan *tracking* dimana *setpoint* yang diinginkan dapat tercapai dan sistem dapat stabil terhadap beban yang diputar. Untuk mengatasi permasalahan yang terjadi, maka dirancang Kontroler *Linear Quadratic Tracking* dimana kontroler tersebut menggunakan metode optimal kontrol sehingga kecepatan motor dapat mengikuti *tracking* yang telah ditentukan.

III. PERANCANGAN SISTEM

Secara umum alur proses dari pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa menggunakan *Linear Quadratic Tracking* dengan *Programmable Logic Controller* dapat dilihat pada Gambar 1 untuk memonitoring nilai *Setpoint*, *Present Value*, Model *Following* dan *Kalman Gain* menggunakan *software* HMI GT Desaigner3. Kontroler *Linear Quadratic Tracking* ditanamkan kedalam *Programmable Logic Controller* (PLC) yang akan digunakan dengan bahasa pemrograman *ladder diagram* untuk mengatur kecepatan motor induksi, dari PLC sinyal kontrol akan keluar melalui modul DAC (Q62DA). Sinyal kontrol yang dihasilkan ini berupa tegangan. Pada Tugas Akhir ini, keluaran dari modul DAC yang digunakan adalah *range* 0-5 Volt. Oleh karena itu, dibutuhkan *non-inverting amplifier* untuk menguatkan tegangan ke *inverter* yang nantinya akan memutar motor induksi 3 fasa. Dari motor induksi kemudian ada umpan balik melalui *tachogenerator* masuk ke rangkaian pembagi tegangan dan dilanjutkan ke modul ADC (Q64AD) yang pada akhirnya akan diolah datanya oleh PLC. Gambar 1 memperlihatkan diagram blok sistem secara keseluruhan.



Gambar. 1. Blok Fungsional Sistem.



Gambar. 2. Perancangan I/O Modul PLC.

A. Programmable Logic Controller

Programmable Logic Controller adalah sistem elektronik yang beroperasi secara *digital* dan didesain untuk pemakaian di lingkungan industri, dimana sistem ini menggunakan memori yang dapat diprogram untuk penyimpanan secara internal instruksi-instruksi yang mengimplementasikan fungsi-fungsi spesifik seperti logika, urutan, perwaktuan, pencacahan dan operasi aritmatik untuk mengontrol mesin atau proses melalui modul-modul I/O *digital* maupun *analog*. [2] Dimana PLC akan digunakan sebagai *controller* pada penelitian ini adalah PLC Mitsubishi *Q-series*.

Pada Gambar 2 komponen pada modul *controller* terdiri dari enam modul, yaitu: modul *power suplay*, CPU, *digital input*, *digital output*, *analog input*, *analog output*, dan modul *base plate*. Spesifikasi dari modul-modul yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. *Power supply* (Q61P): masukan *power supply* (100 – 240 VAC), keluaran 5 VDC (6A).
2. CPU (Q02HCPU): kapasitas program (28 *kstep*), kecepatan pemrosesan (0,034 μ sec), tipe memori (standar ROM).
3. *Digital input* QX42 terdiri dari 64 *point*, 32 *point* dan 32 *common*, dengan tegangan 24 VDC *input* (4mA), dan tipe pengkabelanya menggunakan *sink type*
4. *Digital output* QY42P terdiri dari 64 *point*, 32 *point* dan 32 *common*, dengan tegangan 12 to 24 VDC, Dan sudah didukung dengan perlindungan *termal* dan *short sirkuit* serta tegangan kejut.

1. *Analog Input* (Q64AD): total *channel analog* (4 ch), *range* konversi dari *analog* ke *digital* adalah 0 – 5 V DC *linear* dengan nilai *digital* 0 – 4000,
2. *Analog output* (Q62DA): total *channel analog* (2 ch), *range* konversi dari *digital* ke *analog* adalah 0 – 5 VDC linier dengan nilai *digital* 0 – 4000,

Bahasa pemrograman yang digunakan adalah *ladder*. *Software* yang digunakan untuk pemrograman PLC adalah *software integrasi* berbasis windows tipe GX Work2 versi 1.77F [2].

B. Identifikasi Sistem

Proses identifikasi dilakukan secara *open loop* dan statis dengan memberikan sinyal *step* dan melihat respon berupa kecepatan putar. Sinyal uji *step* diberikan secara manual melalui *autotransformator*, kemudian hasil respon *plant* yang terbaca oleh *tachogenerator* ditampilkan pada komputer melalui proses akuisisi data dengan PLC Mitsubishi. Pengambilan data untuk proses identifikasi dilakukan sebanyak 4 kali, kemudian dicari nilai RMSE yang paling kecil [3].

4 metode identifikasi diterapkan pada satu sampel data untuk didapatkan metode yang paling sesuai. Hasil pengitungan terbaik dengan nilai RMSE terkecil dari berbagai macam metode ini kemudian diterapkan ke 4 data yang lainnya. Keempat metode identifikasi tersebut adalah metode Viteckova orde 1, Viteckova orde 2, Respon orde 1

dan Sundaresan Krishnaswamy. Pada Tugas Akhir ini metode Vitecova orde 2 dipilih karena memiliki validasi nilai RMSE yang paling kecil dari ketiga metode yang lain. Hasil validasi pemodelan berbagai metode beserta nilai RMSE dari masing-masing metode dapat dilihat pada Tabel 1, sedangkan perbandingan respon pemodelan dengan respon *plant* nyata ditampilkan pada Gambar 3 dengan *Simulation stop time* 32 detik.

Dari hasil identifikasi yang telah dilakukan, dan hasil dari validasi pemodelan dengan menggunakan metode RSME (*Root Mean Square Error*), maka dipilih pemodel yang memiliki hasil RSME terkecil yaitu dengan metode Viteckova orde 2. Setelah ditentukan metode identifikasi yang digunakan maka diambil 4 data untuk dilakukan identifikasi dengan metode Viteckova orde 2 dan didapat seperti Tabel 2.

C. Perancangan Kontroler LQT

Ada beberapa prosedur yang dilakukan untuk mendapatkan parameter kontroler *Linear Quadratic Tracking* (LQT). Penghitungan parameter kontroler LQT membutuhkan parameter *plant* dalam bentuk *state space*. Oleh karena itu fungsi alih sistem harus dirubah dalam representasi *state space*. Didapatkan model matematika motor DC dari proses identifikasi [4].

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{0,9679}{2,8155s^2 + 3,3554s + 1} \tag{1}$$

Kemudian persamaan *transfer function* diatas diubah dalam bentuk *state space*, Maka representasi *plant* dalam *state space* sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1,1921 & -0,3553 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \tag{2}$$

$$y = [0 \quad 0,3439] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \tag{3}$$

Penghitungan parameter kontroler dilakukan melalui beberapa tahap:

1. Penyelesaian matrik *Aljabar Riccati Equation* (ARE)
2. Penghitungan *state optimal* $x^*(t)$
3. Mencari *Optimal control* $u^*(t)$ dengan ,

$$u^*(t) = -K(t)x^*(t) + R^{-1}(t)B'(t)g(t) \text{ dimana,}$$

$$K(t) = R^{-1}(t)B'(t)P(t) \text{ adalah Kalman Gain .}$$

Dengan memasukkan nilai parameter,

$$A = \begin{bmatrix} -1,1921 & -0,3553 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad C = [0 \quad 0,3439] \quad D = [0]$$

Sinyal Kontrol terdiri dari Kalman Gain dan *Model Following*

Model Following didapat dari hasil $R^{-1}(t)B'(t)g(t)$ Dimana

$$\dot{g}(t) = -[A(t) - E(t)P]^T g(t) - W(t)z(t) \tag{4}$$

Nilai $g(t)$ merupakan hasil dari integral $\dot{g}(t)$. Untuk lebih memudahkan perhitungan pada Tugas Akhir ini dapat diketahui

$$E = [BR^{-1}B^T]$$

$$W = [CT^*Q]$$

$$EB = [RI^*BT]$$

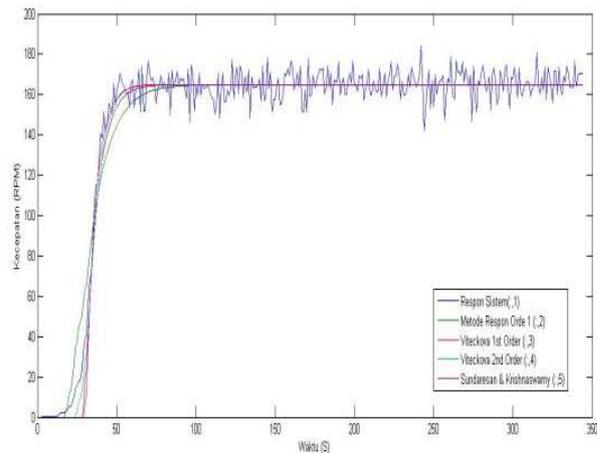
$$ABT = \text{Transpose } [A-B^*R^*BT^*P]$$

Tabel 1. Perbandingan Metode Pendekatan Model

No	Metode	Model Matematika	RMSE
1.	Viteckova 1 st Order	$\frac{0,824850963}{0,746502s + 1} e^{-0,48837992s}$	7,56
2.	Viteckova 2 nd Order	$\frac{0,824850963}{0,226654452s^2 + 0,9521648s + 1} e^{-0,22225742s}$	7,21
3.	Sundaresan & Krishnaswamy	$\frac{0,824850963}{0,606752s + 1} e^{-0,35537s}$	7,33
4.	Respon Orde 1	$\frac{0,824850963}{1,194s + 1}$	8,96

Tabel 2. Hasil Identifikasi Viteckova Orde 2 Motor Sentrifugal dengan Beban

No	Persamaan Model Plant	RMSE
1	$\frac{0,947903}{2,01998s^2 + 2,84252s + 1} e^{-1,23477s}$	35,96
2	$\frac{0,953877}{3,026396s^2 + 3,479308s + 1} e^{-0,883022s}$	37,64
3	$\frac{0,953101}{2,688321s^2 + 3,27922s + 1} e^{-1,015092s}$	48,59
4	$\frac{0,967932}{2,814751s^2 + 3,355444s + 1} e^{-0,35537s}$	35,32



Gambar. 3. Respon Identifikasi Pendekatan Model dengan Berbagai Metode.

Dan P adalah penyelesaian persamaan *Aljabar Riccati* $-PA - A^T P - Q + PBR^{-1}B^T P = 0$

$$\text{Sehingga } \dot{g}(t) \text{ menjadi,} \tag{5}$$

$$\dot{g}(t) = -ABT(t)g(t) - W(t)z(t) \tag{6}$$

Keterangan:

CT= nilai dari matrik C transpose

RI= Inverse dari pembobot R

BT= nilai dari matrik B transpose

4. Pemilihan Matrik Q dan R

Matrik Q adalah matrik yang nilainya menentukan lebar area *state*, sedangkan matrik R adalah matrik yang nilainya menentukan lebar jangkauan aksi kontrol. Semakin besar matrik Q maka akan memperbesar elemen penguatan *state feedback gain* K sehingga akan mempercepat respon mencapai keadaan tunak. Untuk hasil desain yang baik maka dipilih harga matrik Q besar dan R kecil. Dengan demikian dipilih nilai matrik Q dan R sebesar,

$$Q = 100 \quad R = 1 \tag{7}$$

Tabel 3.
Matrik Pembobot Q

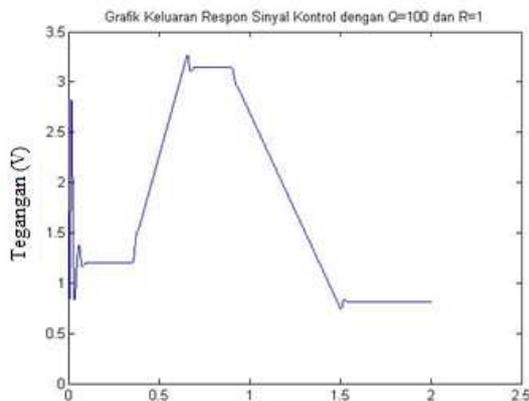
No.	Q	K	RMSE
1.	0,1	[0,0136 0,0163]	431,5
2.	1	[0,1115 0,1392]	249,3
3.	10	[0,5395 0,7887]	60
4.	100	[1,5692 3,1018]	23,43
5.	200	[2,0485 4,5209]	20,07
6.	1000	[3,5483 10,5249]	15,76
7.	10000	[7,1440 34,0344]	13,7

Tabel 4.
Hasil dari Variasi R

No	Nilai R	Nilai Q	Error (%)	Kecepatan Maksimum
1	0,1	1	186	2295 rpm
2	0,5	1	6,25	750 rpm
3	1	1	52,25	328 rpm
4	10	1	100,625	-5 rpm

Tabel 5.
Hasil dari Variasi Q

No	Nilai R	Nilai Q	Error (%)	Kecepatan Maksimum
1	0,5	0,1	84,21	126,3 rpm
2	0,5	0,5	39,175	486,6 rpm
3	0,5	2	33,25	1066 rpm
4	1	10	10	720 rpm
5	1	100	1,0625	791,5 rpm
6	1	1000	0	800 rpm



Gambar. 4. Respon Sinyal Kontrol dengan $Q=100$.

D. Analisa Dengan Variasi R dan Q

Matrik pembobot R dan Q diperoleh dari uji coba pengambilan data pada beberapa variasi nilai Q dan R . Pada pengujian menentukan matrik R dilakukan dengan cara memilih variasi matrik R dengan matrik Q yang tetap dan sebaliknya untuk pengujian menentukan nilai dari matrik Q . Dari hasil tersebut akan didapat gambar respon yang selanjutnya dianalisa untuk mendapatkan matrik pembobot R dan Q yang sesuai. Berikut ini akan ditunjukkan grafik respon *tracking* dengan variasi nilai R dan nilai Q tetap.

Dari hasil simulasi didapat hasil seperti Tabel 4 dan Tabel 5 dimana variasi R dan Q dapat mempengaruhi grafik respon. Dari grafik-grafik pengujian sistem dengan LQT untuk variasi nilai R , bahwa hasil respon dapat mengikuti lintasan *tracking* namun masih terdapat *error* hasil keluaran kecepatan yang cukup besar. Nampak bahwa dengan

diberikannya nilai Q yang semakin besar maka respon akan berada dibawah respon yang diharapkan dan tidak memenuhi *setpoint* yang ditentukan yaitu ketika nilai $R=10$. Nilai optimal dalam variasi nilai R ini berada pada range $R=0,1$ mengakibatkan respon berada diatas respon yang diharapkan dan tidak memenuhi *setpoint*. Sedangkan range $R=1$ kontroler juga berada dibawah *setpoint* namun masih dalam range yang diinginkan. Variasi nilai R paling mendekati *setpoint* adalah $R=0,5$ dengan kecepatan maksimum yaitu 750 rpm. Dimana tabel perbandingan % *Error* nilai R dan *output* kecepatan maksimum dapat dilihat dalam Tabel 4.

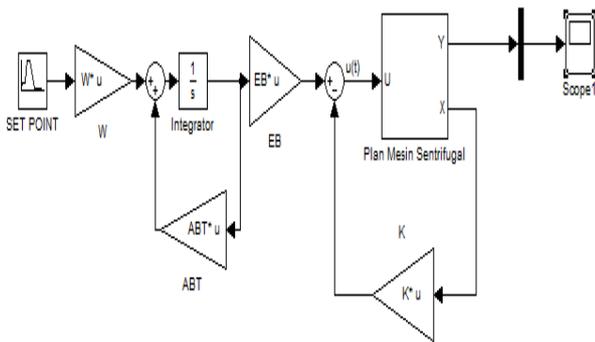
Dari data pada Tabel 4. belum dapat diambil kesimpulan bahwa matrik R yang akan digunakan pada penelitian ini karena terdapat 2 nilai yang berada dibawah *error* 100% dan dapat dibandingkan nilainya dengan matrik Q untuk mendapatkan matrik pembobot yang paling sesuai. Dari hasil simulasi pengujian sistem dengan LQT untuk variasi nilai Q , nampak bahwa dengan diberikannya nilai Q yang semakin besar maka respon akan semakin besar pula hal ini dapat terlihat dari respon simulasi. Selanjutnya dapat dilihat nilai %*error* pada tabel variasi nilai Q dan *output* kecepatan dapat dilihat dalam Tabel 5.

Pada nilai $Q=0,1$ dan $R=0,5$ didapat nilai *error* yang melebihi toleransi sebesar 10% sedangkan pada $R=1$ dan $Q=1, Q=10, Q=100$ dan $Q=1000$ nilai *error* tidak lebih dari 10 % artinya kontroler dapat bekerja dengan baik. Dengan variasi nilai Q ini dapat diketahui bahwa pada *plant* ini kontroler bekerja dengan optimal pada range Q sebesar 100 dan 1000. Sesuai dengan prinsip kontrol optimal dimana dari range nilai Q yang ditentukan maka akan ada nilai terbaik yang akan menghasilkan respon yang diharapkan dan itu terjadi pada nilai $Q=1000$ karena memiliki *error* yang lebih kecil dari nilai $Q=100$. Selanjutnya untuk menentukan matrik Q yang akan digunakan pada implementasi maka perlulah dilakukan pengujian sinyal kontrol yang akan keluar dari *analog output* PLC. Perlu diperhatikan bahwa sinyal kontrol yang akan keluar tidak boleh melebihi 5 VDC karena *plant* yang dibuat dengan menggunakan *inverter* ini hanya dapat menerima tegangan 0-5 V DC.

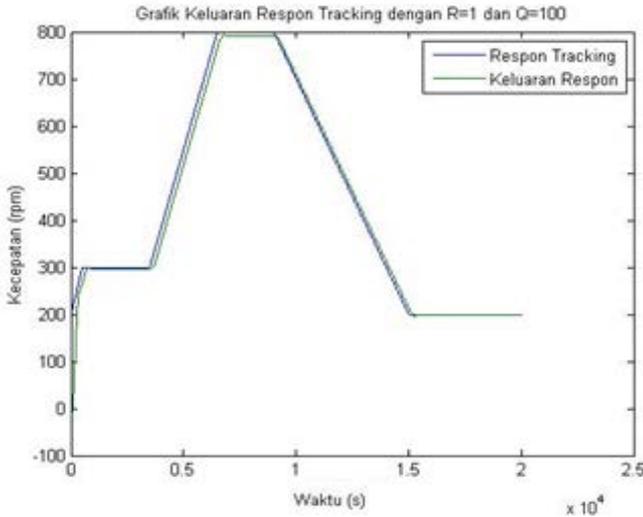
Hasil simulasi menunjukkan sinyal kontrol dan sinyal saturasi dari variasi nilai Q berbeda. Ketika $Q=1000$ maka sinyal kontrol mengeluarkan tegangan diawal yang cukup besar hingga ± 10 V setelah di saturasi barulah sistem dapat keluaran maksimal 4 V karena nilai maksimal saturasi yang ditentukan adalah 4 V. Sedangkan $Q=100$ memiliki sinyal kontrol dan sinyal saturasi yang sama karena tegangan maksimal berada dibawah nilai saturasi. Maka pada penelitian Tugas Akhir ini untuk hasil yang maksimal dipilih nilai $Q=100$ agar dapat diimplementasikan dengan baik.

E. Simulasi dalam Bentuk State

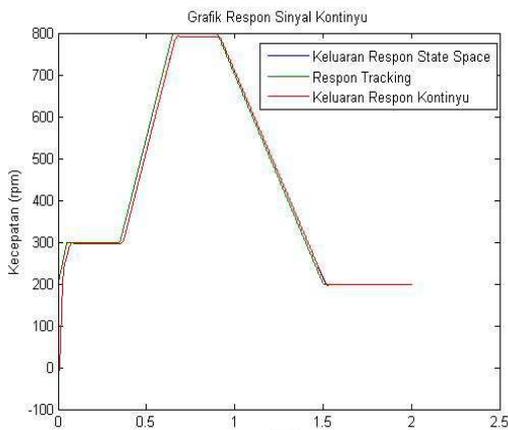
Pada umumnya, untuk mencari sinyal kontrol LQT dalam persamaan bentuk state. Oleh karena itu dilakukan simulasi yang parameternya berupa persamaan state. Berikut ini adalah blok diagram simulink untuk simulasi kontroler LQT untuk mengatur kecepatan motor pada mesin sentrifugal.



Gambar. 5. Blok Diagram Simulink Kontrol LQT.



Gambar. 6. Keluaran Respon Sinyal Bentuk Kontinyu .



Gambar. 7. Keluaran Respon Sinyal Bentuk Kontinyu

Dengan nilai pembobot,
 $Q = 100$ $R = 1$

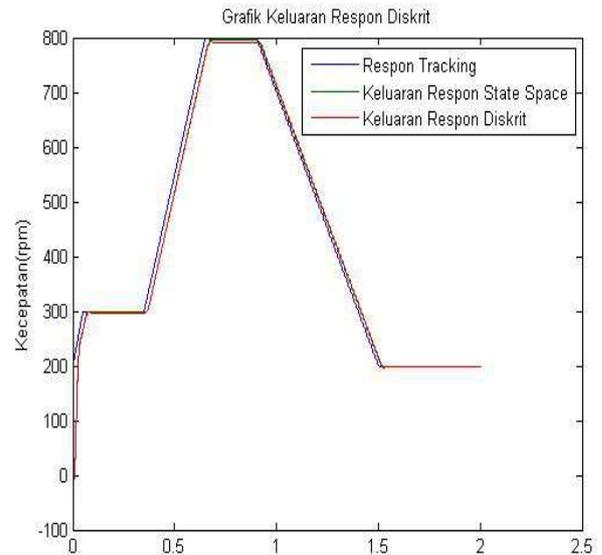
Dan Dari perhitungan pada bagian C maka didapatkan nilai parameter untuk kontrol sebagai berikut:
 Model *Following* :

$$W = \begin{bmatrix} 0 \\ 34,3878 \end{bmatrix}$$

$$EB = [1 \ 0]$$

$$ABT = \begin{bmatrix} -2,7613 & 1 \\ -3,4571 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} 1,5692 & 3,1018 \\ 3,1018 & 9,1225 \end{bmatrix}$$



Gambar. 8. Keluaran Respon Sinyal Bentuk Diskrit.

Kalman Gain :

$$K = [1,5692 \ 3,1018] \tag{8}$$

Keluaran respon keluaran sinyal dalam bentuk kontinyu dapat dilihat pada Gambar 6

F. Simulasi dalam Bentuk Kontinyu

Untuk melakukan implementasi maka perlu merubah persamaan state ke diskrit, namun untuk mendapatkan persamaan diskrit perlu dirubah dahulu ke bentuk persamaan kontinyu dan didapatkan persamaan kontroler LQT:

Persamaan Model *Following*

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{34,3878}{s^2 + 2,7613s + 3,4571} \tag{9}$$

Persamaan *Kalman Gain* :

$$K_2 = \frac{3,1018 \times 2,9 \times x_2(s)}{x_2(s)} \tag{10}$$

$$K_1 = \frac{7,846 \times \{(2,9 \times x_2(s) - 2,9 \times \dot{x}_2(s))\}}{x_1(k)} \tag{11}$$

G. Simulasi dalam Bentuk Diskrit

Setelah mendapatkan persamaan bentuk kontinyu maka diubah ke bentuk diskrit dan didapatkan seperti Persamaan 5 (*Model Following*) dan 6 dan 7 (*Kalman Gain*) :

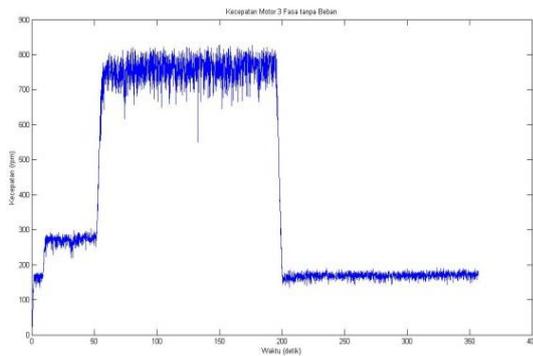
$$\frac{ym(k)}{yr(k)} = \frac{0,5705z^{-1} + 0,4744z^{-2}}{1 - 1,471z^{-1} + 0,5756z^{-2}} \tag{12}$$

$$K_2 = \frac{3,1018 \times 2,9 \times x_2(k)}{x_2(k)} \tag{13}$$

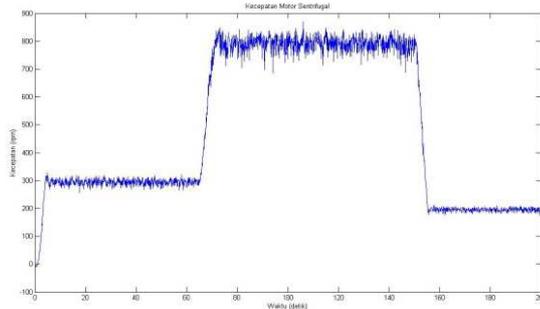
$$K_1 = \frac{7,846 \times \{2,9 \times x_2(k) - 2,9 \times x_2(k-1)\}}{x_1(k)} \tag{14}$$

IV. IMPLEMENTASI DAN ANALISA

Implementasi yang dilakukan adalah menerapkan metode kontroler ke dalam PLC, dimana implementasi yang dilakukan adalah dengan membuat dua jenis program yaitu dengan tanpa kontroler dan dengan kontroler LQT dengan konfigurasi seperti pada Gambar 1.



Gambar 9. Hasil Implementasi tanpa Kontroler.



Gambar 10. Hasil Implementasi dengan Kontroler LQT.

A. Implementasi tanpa Kontroler

Implementasi tanpa kontroler adalah dengan membuat program dengan pergantian *set point* berdasarkan waktu dan didapat hasil implementasi seperti Gambar 9.

B. Implementasi dengan kontroler LQT

Untuk melakukan implementasi kontroler LQT ke dalam PLC maka perlu merubah kontroler dari bentuk kontinyu ke bentuk diskrit. Dari hasil diskrit tersebut maka dibuat algoritma. Dimana ada 2 bagian penting yaitu *Model Following* dan *Kalman Gain* yang selisihnya merupakan sinyal kontrol. Hasil dari implementasi dari Kontroler LQT dengan menggunakan PLC respon nya dapat dilihat pada Gambar 10.

Hasil dari implementasi Kontroler ini adalah Kecepatan motor induksi dapat mengikuti dengan *tracking* yang telah ditentukan. Jika pada implementasi tanpa Kontroler terjadi *error* sebesar 15,83% untuk kecepatan 200 rpm, 8,736% untuk 300 rpm dan 5,2% untuk kecepatan 800 rpm.

Sedangkan jika menggunakan Kontroler LQT *set point* yang diinginkan dapat tercapai. Jadi dapat diambil kesimpulan bahwa LQT dapat mengatasi permasalahan *tracking* pada mesin *sentrifugal* dan menghilangkan *error* yang ada.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis F.H. mengucapkan terima kasih kepada Pabrik Gula Toelangan, PTPN X yang telah memberikan dukungan dengan memperkenankan untuk pengambilan data dan Laboratorium PLC(AA103) D3 Teknik Elektro ITS untuk peminjaman PLC Mitsubishi Q-Series yang dipergunakan dalam pengerjaan penelitian ini.

V. KESIMPULAN

Dari hasil desain kontrol LQT yang telah dikerjakan dan beberapa penerapan dalam tugas akhir ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. *Plant* mengalami saturasi pada tegangan masukan lebih dari 4 Volt DC atau kecepatan motor lebih dari 1000 rpm.
2. Matrik *R* pembobot yang digunakan pada parameter kontrol LQT pada Tugas Akhir ini bernilai 1 untuk mendapatkan hasil *tracking* yang maksimal.
3. Matrik *Q* pembobot yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah 100 karena apabila matrik *Q* terlalu besar akan mengakibatkan *plant* membutuhkan sumber daya yang besar.
4. Kontrol optimal LQT dapat diimplementasikan pada PLC dengan *ladder diagram*.
5. Kontrol optimal LQT mampu mengontrol kecepatan motor AC induksi 3 Fasa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ika Putri, R., Fauziah, M., dan Setiawan, A. Penerapan Kontroler Neural Fuzzy Untuk Pengendalian Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa pada Mesin Sentrifugal, *INKOM, Vol. III, No. 1-2, Nop 2009*, 53-64.
- [2] Alfiyan Rizki Matra, "Perancangan dan Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Kontroler PID Fuzzy dengan PLC", *Tugas Akhir, JTE-ITS, Surabaya, 2013*
- [3] Ing. Pavel Jakoubek, "Experimental Identification of Stable Nonoscillatory Systems from Step-Responses by Selected Methods", *Konference Students kétvürčičinnosti, 2009*.
- [4] Naidu, Desineni Subbaram. *Optimal Control System*. CRC Press: New York, 2003.